



## **Digsure : une méthode et un outil SIG d'aide au diagnostic et à la gestion des digues fluviales**

R. Tourment, L. Peyras, G. Bambara, B. Beullac, C. Casteigts, C. Delaunay,  
M. Vuillet, J.C. de Massiac, A. Allouche, L. Nicolas

### **► To cite this version:**

R. Tourment, L. Peyras, G. Bambara, B. Beullac, C. Casteigts, et al.. Digsure : une méthode et un outil SIG d'aide au diagnostic et à la gestion des digues fluviales. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national - Dignes2013, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. pp.122-128. hal-01141497

**HAL Id: hal-01141497**

**<https://hal.science/hal-01141497>**

Submitted on 13 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Digsure : une méthode et un outil SIG d'aide au diagnostic et à la gestion des digues fluviales

## *Digsure: a method and a GIS tool for levee assessment and decision support of levees*

R. Tourment<sup>1</sup>, L. Peyras<sup>1</sup>, G. Bambara<sup>1</sup>, B. Beullac<sup>1</sup>, C. Casteigts<sup>2</sup>, C. Delaunay<sup>2</sup>  
M. Vuillet<sup>3</sup>, J-C. De Massiac<sup>3</sup>, A. Allouche<sup>4</sup>, L. Nicolas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Irstea

<sup>2</sup> Société du Canal de Provence

<sup>3</sup> G2C Informatique & G2C Environnement

<sup>4</sup> DESMID CNRS UMR ESPACE 7300 & RESSOURCE

### Résumé

La France, ainsi que d'autres régions du monde, sont fréquemment l'objet d'épisodes de crues dévastatrices. Les dégâts humains et matériels sont amplifiés en cas de rupture d'un ouvrage de protection. Malheureusement, ces structures à longs linéaires sont des ouvrages le plus souvent mal entretenus et ayant montré des signes de fragilité à de nombreuses reprises. Aussi, la gestion des digues fluviale soulève plusieurs problèmes considérables pour les décideurs chargés de garantir une sécurité maximale à la population pour un coût de gestion acceptable. Le projet *Digsure* a pour vocation de proposer aux gestionnaires des méthodes scientifiques ainsi que des outils techniques de gestion des digues. Ces outils d'aide au diagnostic permettront d'évaluer la performance des digues tout le long du linéaire.

### Abstract

France, as many other parts of the world are often subject to devastating floods episodes. Human and material damages are amplified in case of failure of flood protection structures. Unfortunately, these structures are long linear structures, often poorly maintained and showing signs of weakness. Thus, the management of levees raises several significant challenges for policy-makers in charge of population safety management, particularly when they must provide and ensure safety for an acceptable management cost. *Digsure* project aims to provide managers with scientific methods and technical tools for levees management. These levee assessment tools aim to evaluate the performance of levees all along the linear.

### Introduction

#### Digue et zone endiguée

Les digues fluviales sont des ouvrages de génie civil à grand linéaire. Elles ont pour fonction de prévenir les venues d'eau dans les zones naturelles sujettes aux inondations. L'étendue du linéaire de digue et de sa zone protégée peut varier considérablement. Il existe des digues de seulement dix mètres de long qui protègent des superficies inférieures à un hectare. À l'inverse, certaines digues peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres pour protéger la plaine aux abords d'un grand fleuve. A sec en temps normal, elles ne sont parfois pas sollicitées pendant plusieurs années, d'où parfois un manque de suivi constaté. Les digues sont des structures anciennes, mal connues et mal entretenues. Si elles résistent à la plupart des crues saisonnières, il leur arrive néanmoins de céder brutalement sous l'effet de phénomènes exceptionnels.

Ainsi, les digues peuvent aggraver la dangerosité des crues. Bien que le niveau d'eau augmente progressivement au cours d'une crue, la brèche d'une digue s'apparente à un risque technologique susceptible de générer une onde de submersion violente. Une seule brèche peut mettre en péril l'ensemble du système de protection. Plusieurs catastrophes récentes sont là pour le rappeler : crues du Gard en 2002 et du Rhône en 2003, tempêtes Katrina en 2004 et Xynthia en 2010, etc.

#### Enjeux et objectifs de la méthode et de l'outil *Digsure*

Les digues sont porteuses de nombreux enjeux techniques. L'évaluation de la performance des ouvrages fait appel à de nombreuses compétences : génie civil, hydraulique, hydrologie, géotechnique, géophysique, etc. Ces paramètres, ainsi que l'apparition de signes de dérèglements divers tels que les fuites, les érosions, etc., varient considérablement le long du linéaire de digue. De

par la nature des ouvrages et de part les coûts et limites des technologies d'investigation, les données disponibles sur les digues sont généralement incertaines et incomplètes. Dans ce contexte, la mission de l'ingénieur est double : produire une interprétation et une extrapolation des données spatiales, puis évaluer qualitativement par expertise le niveau de performance des ouvrages.

Depuis les années 2000, la réglementation française impose aux gestionnaires d'exécuter des évaluations régulières de leurs digues, ainsi que des inspections visuelles périodiques. Dans de nombreux cas, la réalisation d'une étude de dangers est également requise et doit inclure une évaluation de la vulnérabilité de la zone protégée. L'étude de dangers d'une digue doit être exécutée suivant le même principe que celui appliqué aux barrages et aux autres industries à risque technologique. Les ingénieurs doivent également tenir compte d'un large éventail de données et d'incertitudes qui se manifestent tout le long du linéaire de digue. Les gestionnaires sont tenus d'assurer un suivi régulier de la performance des ouvrages et d'établir des priorités pour leurs interventions de maintenance. Un outil capable de remplir ces objectifs serait donc un avantage, voire un besoin majeur pour les gestionnaires. Amorcé en 2009, le projet de recherche et développement *Digsure* a pour vocation de répondre à ces besoins. Il se compose de trois axes :

- Un premier axe de recherche visant à produire un modèle d'évaluation de la performance des digues à grand linéaire, qui intègre les principaux mécanismes de rupture et prend en considération l'incertitude des données ;
- Un deuxième axe de recherche consistant à analyser des aspects rarement évalués qui sont la vulnérabilité des territoires protégés par les digues, notamment les composants économique, sociale et environnementale de la vulnérabilité ;
- Un troisième axe technique destiné à produire un outil de SIG opérationnel, appelé l'outil *Digsure*, pour calculer et spatialiser la performance des digues vis-à-vis des différents mécanismes, sous forme d'indicateurs de performance, et destinés à fournir aux bureaux d'études et/aux services techniques des gestionnaires un outil d'aide au diagnostic et à la gestion des digues.

Cet article se focalise sur les aspects de l'aide au diagnostic du projet *Digsure* (axes 1 et 3 précédents). Notre présentation traitera tout d'abord le développement d'indicateurs de performance d'une digue fluviale. Ces indicateurs permettent d'identifier, en situation de crue, les zones sensibles et sujettes à une brèche éventuelle. Les indicateurs de performance composent le module d'évaluation de la performance des digues. La deuxième partie du projet sera consacrée au développement d'un outil SIG *Digsure* intégrant les indicateurs de performance des digues. Cette partie vise à permettre, aux bureaux d'études

et aux services techniques des gestionnaires, d'appréhender la performance de chaque tronçon de digue.

### **Développement d'un modèle d'évaluation de la performance des digues**

#### **Modélisation fonctionnelle des digues**

Plusieurs mécanismes de détérioration peuvent exposer les digues au risque de rupture. La forme et la combinaison des mécanismes de rupture sont très variées et complexes. On considère dans la littérature technique 4 mécanismes de rupture :

- érosion interne,
- submersion,
- affouillement et
- glissement côté fleuve ou côté val.

Un mécanisme de rupture des digues est un enchaînement de mode de défaillance des composants des digues, correspondant donc à une succession de dégradation des fonctions de ces composants.

Nous avons développé un modèle fonctionnel pour les mécanismes des digues à l'aide des méthodes de la Sûreté de fonctionnement : l'analyse fonctionnelle et l'Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). Ces méthodes permettent d'identifier toutes les fonctions des composants des digues, leurs modes de défaillance, ainsi que les causes et les effets des modes de défaillance. L'application de ces méthodes, en collaboration avec un groupe d'ingénieurs spécialisés dans le domaine des ouvrages hydrauliques, a permis d'identifier les critères d'évaluation des digues en remblai et leurs indicateurs d'états. Enfin, la modélisation des mécanismes de défaillance a été obtenue par la mise en œuvre de méthodes du raisonnement qualitatif et une représentation par graphes causaux [3]. Le modèle fonctionnel permet une représentation des mécanismes de rupture en séquences de défaillances successives, en fonction de critères et d'indicateurs d'états associés aux critères [3]. La figure suivante montre l'exemple de la modélisation du mécanisme de surverse et des critères et indicateurs d'états impliqués dans le mécanisme.

Dans la modélisation fonctionnelle, les critères correspondent aux variables qui fixent la performance des fonctions et les indicateurs d'états sont les variables qui renseignent les critères. Les données entrant dans la modélisation fonctionnelle sont celles utilisées par l'ingénierie des digues. Elles comprennent des données visuelles issues de l'observation de terrain, des données géotechniques issues d'essais et des données issues de modèles mécaniques, hydrauliques et numériques. Ces données constituent les informations essentielles pour l'évaluation des digues. Au final, ce sont 26 critères d'évaluation des digues et près de 90 indicateurs d'états associés qui ont été définis. Nous avons modélisé leurs mécanismes de rupture par graphe causaux. Les indicateurs

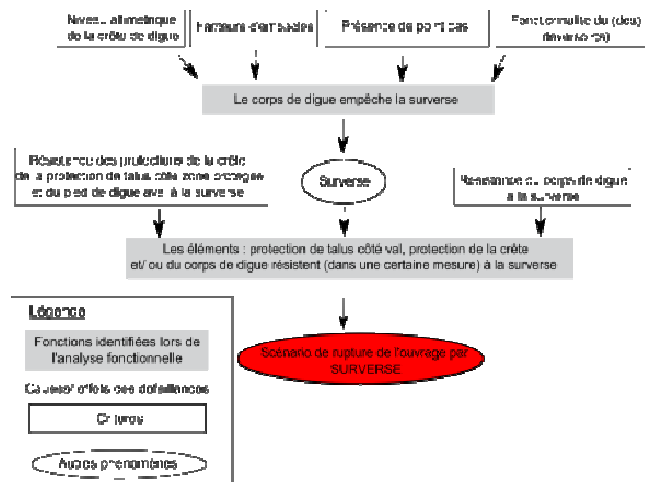


FIGURE 1. MODELISATION DU MECANISME DE RUPTURE PAR SURVERSE

d'états ont été détaillés de manière à permettre de développer un modèle de données permettant d'être intégré dans un SIG pour l'évaluation de la performance des digues [3].

*Exemple :* la fonction d'étanchéité d'une digue est évaluée par les critères « perméabilité » et « singularités ». Ces critères sont eux-mêmes renseignés par les indicateurs d'état « épaisseur » ou « fuites », etc.

TABEAU 1. CRITERES DU MECANISME DE RUPTURE PAR EROSION INTERNE

|   |
|---|
| Perméabilité du corps de digue                              |
| Résistance du corps de digue à l'érosion interne            |
| Singularités dans le corps de digue                         |
| Perméabilité de la fondation de la digue                    |
| Résistance de la fondation à l'érosion interne              |
| Singularités dans la fondation de la digue                  |
| Résistance à l'érosion de contact corps de digue/ fondation |
| Singularités dans interface corps de digue/ fondation       |

TABEAU 2. INDICATEURS D'ETATS POUR « PERMEABILITE DU CORPS DE DIGUE »

| Critères (Ci)                             | Indicateur d'états (IE)           | Informations nécessaires   |
|---|-----------------------------------|--|
| C1, 2 - Perméabilité du corps de digue    | Perméabilité du matériau          | Test de perméabilité   |
|   |                                   | Perméabilité verticale   |
|   |                                   | Perméabilité horizontale   |
|   |                                   | Estimation de la granulométrie                                     |
|   |                                   | Estimation du compactage   |
|   | Géométrie                         | Disposition des matériaux  |
|   |                                   | Variabilité des matériaux  |
|   | Fuites (eau claire)               | Durée de la crue   |
|   |                                   | Crue d'observation   |
|   |                                   | Modalité d'observation (en crue, post crue, témoignages, trace...) |
| C3, 4 - Etanchéité de la protection amont | Etanchéité de la protection amont | Débit (grosse fuite, filet d'eau...)                               |
|   |                                   | Position (bas de talus, mi-hauteur...)                             |
|   |                                   | Type de protection (perré, bitume etc.)                            |
|   |                                   | Disposition (rôle d'étanchéité prévu)                              |

## Développement d'indicateurs de performance des digues

A la différence d'autres systèmes à grands linéaires tels que les réseaux d'eau potable ou d'eau usée, il n'y a pas sur le terrain d'éléments ou de singularités physiques faisant l'objet de règles qui fixent le découpage du linéaire de digue en unités d'évaluation de la performance. Les linéaires de digue doivent être modélisés sous forme d'objets linéaires continus, et les informations sont référencées moyennant une segmentation dynamique établie à partir de repères.

Nous proposons d'évaluer les linéaires sur la base de profils transversaux et représentatifs d'un tronçon homogène ou d'une singularité. Le profil constitue donc l'unité minimale à partir de laquelle les informations, et donc la performance, sont considérées comme homogènes.

En accord avec le groupe d'ingénieurs spécialisés chargés de suivre ce projet, nous proposons d'utiliser une double échelle de performance : i) une échelle de préférence discrète de cinq modalités pour formaliser et modéliser la connaissance experte, et ii) une échelle de préférence continue entre [0 et 10] associée à cette précédente échelle de préférence discrète.

|            |   |         |   |          |   |           |   |     |   |    |
|------------|---|---------|---|----------|---|-----------|---|-----|---|----|
| Inexistant |   | Mauvais |   | Médiocre |   | Tolérable |   | Bon |   |    |
| 0          | 1 | 2       | 3 | 4        | 5 | 6         | 7 | 8   | 9 | 10 |

FIGURE 1. ECHELLE D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES DIGUES

Elle permet des analyses quantitatives portant sur les valeurs des différents critères.

Nous proposons la mise en œuvre d'une méthode du critère unique de synthèse pour chaque mécanisme de rupture par la combinaison d'opérateurs d'agrégation selon des règles propres à chaque mécanisme [6]. Nous notons  $C_{j, M}$  pour l'évaluation du critère  $j$  du mécanisme de rupture  $M$ . L'évaluation du critère unique de synthèse est réalisée par étapes d'agrégations intermédiaires notées  $A_{k, M}$ , où  $A$  est la  $k^{\text{ème}}$  agrégation ( $k=1, 2, \dots, n$ ) de critères associée à une séquence fonctionnelle du mécanisme de rupture  $M$ . Ces agrégations intermédiaires sont composées d'opérateurs mathématiques. Les indicateurs de performance peuvent ainsi être formulés selon des fonctions analytiques.

Des indicateurs de performance sont proposés pour chaque mécanisme de rupture. Avec le concours du groupe d'experts, nous testons et ajustons les formulations sur différents cas pour chaque indicateur de performance.

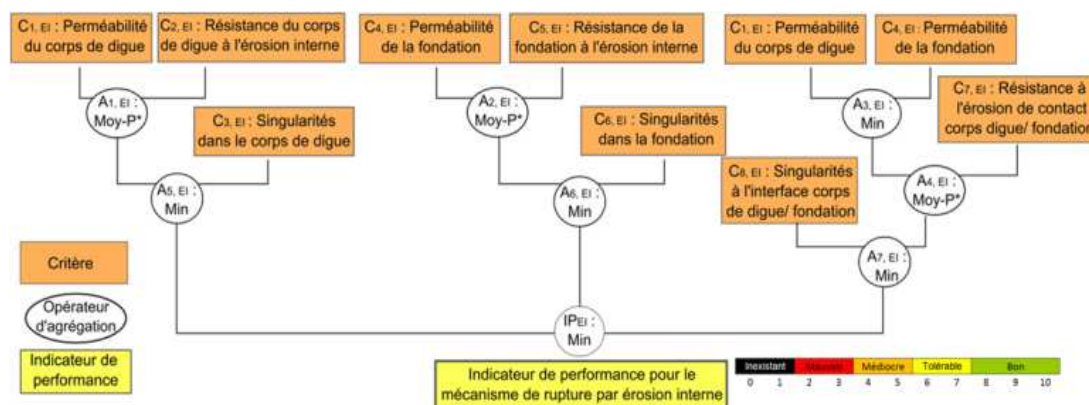


FIGURE 2. ÉCHELLE DE PERFORMANCE ET CRITÈRE UNIQUE DE SYNTHÈSE POUR LE TRI DES TRONÇONS CONCERNANT LE MÉCANISME DE RUPTURE PAR ÉROSION INTERNE

Pour renseigner les critères d'évaluation des digues, il est nécessaire d'utiliser des indicateurs d'états. Pour les indicateurs d'état visuels, des procédures adaptées entre les indicateurs d'états et les critères ont été définies [2]. Pour un critère donné, l'affectation à base de règles permet d'affecter une catégorie de préférence à un objet quelconque, selon des règles prédéfinies de type « SI... ALORS » [2].

Pour les autres indicateurs d'état géotechnique, hydrauliques, etc. de nature plus complexes, nous proposons directement l'éllicitation par jugement expert de chaque valeur de critère. Pour aider l'ingénieur dans ce travail, la méthode *Digsure* fournit à l'ingénieur les informations nécessaires pour évaluer les critères. Celui-ci peut alors estimer la valeur des critères en tenant compte de l'ensemble des indicateurs d'état disponibles.

#### Prise en compte et propagation des incertitudes des données dans le modèle *Digsure*

Les données d'évaluation de la performance des digues sont sujettes à de nombreuses imperfections : incertitudes de la représentativité linéaire et transversale d'un sondage, incomplétude en l'absence d'observation des digues en crue, de test de perméabilité etc. Ces imperfections, combinées à la variabilité des phénomènes de dégradation des digues, empêchent dans la très grande majorité des cas l'ingénieur de s'engager sur une note d'évaluation unique pour le renseignement des critères.

Nous avons étudié les différents formats de prise en compte de la connaissance imparfaite et nous avons proposé l'adoption d'une approche d'éllicitation par jugement expert reposant sur les méthodes des probabilités subjectives [4]. Le principe consiste à ce que l'ingénieur consulte les champs des données relatifs aux indicateurs d'états de chaque tronçon de digue pour estimer les valeurs des critères sous format probabiliste. Nous proposons que l'ingénieur élicite les critères sous la forme d'une variable aléatoire en donnant certains paramètres de sa fonction de

densité. L'ingénieur doit éliciter la valeur « la plus vraisemblable » du critère, associée à son intervalle de dispersion, correspondant à l'intervalle des valeurs vraisemblables. Les paramètres choisis sont le mode et les quantiles 5% et 95%.

Nous avons identifié des lois de probabilités adaptées à l'estimation de l'incertitude des scores de performance : loi normale, loi log normale et loi log normale inverse, ainsi que la loi uniforme. Ces lois sont familières de l'ingénierie et permettent de modéliser l'ensemble des facteurs d'incertitudes des critères d'évaluation des digues. Compte tenu de l'échelle de notation des indicateurs et des critères, il convient de tronquer les lois normales et log normale sur l'intervalle [0,10]. Les fonctions de densité modélisées par l'outil *Digsure* sont ensuite présentées à l'ingénieur qui peut valider ou réajuster les paramètres évalués.

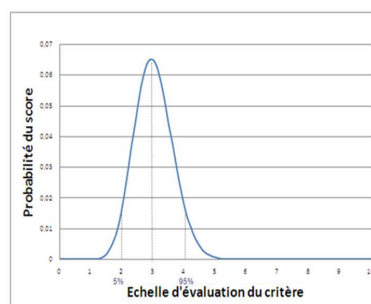


FIGURE 3. AJUSTEMENT D'UNE LOI NORMALE TRONQUÉE À LA VALEUR MODALE 3 ET À L'INTERVALLE DES QUANTILES 5% = 2 ET 95% = 4

Une procédure automatisée permettra d'associer ces valeurs à une fonction de distribution de probabilité suivant une loi normale, log normale ou log normale inverse, selon l'asymétrie éventuelle attribuée à la dispersion de la distribution. Nous intégrons à notre modèle un processus de simulation de Monte Carlo. La méthode *Digsure* fournit au final la distribution de probabilité pour les différents indicateurs de performance.

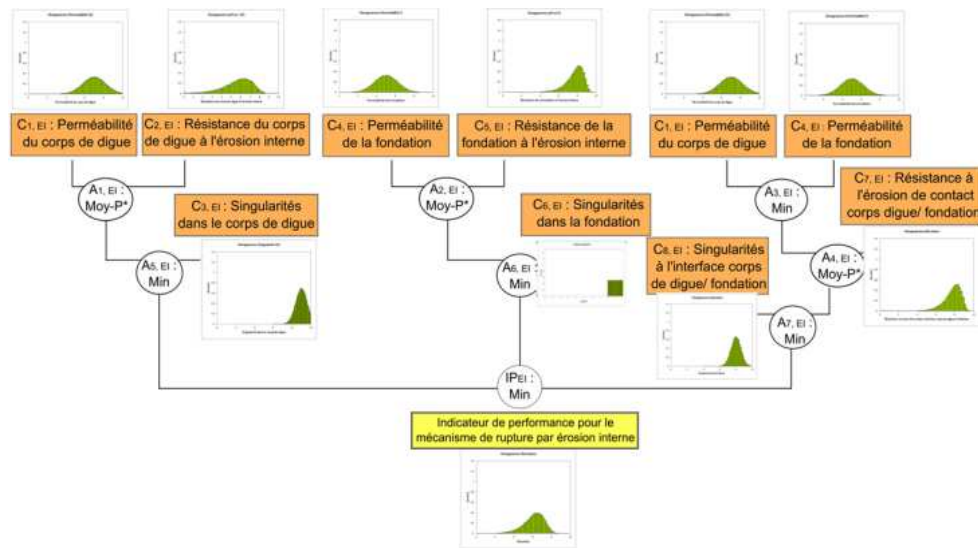


FIGURE 4. PROPAGATION DES INCERTITUDES PAR SIMULATION DE MONTE-CARLO POUR EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES DIGUES EN MODE DE DEFAILLANCE PAR EROSION INTERNE

Ce format a été élargi à chaque mécanisme de rupture et a fait l'objet de plusieurs tests de validation, menés par le groupe d'experts, sur une digue existante du Rhône.

### Développement d'un d'outil d'aide au diagnostic et à la gestion des digues

L'outil *Digsure* vise à évaluer la performance des digues et à quantifier les diverses conséquences (économiques, sociales et environnementales) d'une brèche. Notre choix s'est porté sur un outil de type SIG pour représenter les informations géographiques, les données d'entrée et les résultats, ainsi que la géomatique. L'outil *Digsure* répond aux besoins suivants des utilisateurs :

- Consultation des données (données relatives aux digues ainsi qu'aux enjeux présents dans la zone protégée) ;
- Saisie de données par les agents chargés de réaliser les inspections de routine et les inspections en période de crue ;
- Évaluation par les ingénieurs spécialisés de la performance des différents tronçons homogènes des digues, à l'aide des méthodes élaborées dans l'axe 1 du projet ;
- Évaluation par les ingénieurs spécialisés de la vulnérabilité des zones protégées, à l'aide des méthodes élaborées dans l'axe 2 du projet ;
- Définition par les gestionnaires des priorités de réhabilitation des tronçons de digues, en fonction des résultats des évaluations de la performance des digues et de la vulnérabilité des zones protégées.

### Évaluation de la performance des digues

L'outil *Digsure* comporte une base de données spatialisée rassemblant l'ensemble des informations disponibles relatives aux indicateurs d'états et le modèle probabiliste d'aide à la décision permettant le calcul des indicateurs de performance. La procédure de fonctionnement du logiciel repose sur les étapes détaillées ci-dessous :

- la collecte et le référencement des données relatives aux indicateurs d'états ;
- la segmentation du linéaire pour chaque critère ;
- le développement d'une procédure d'évaluation probabiliste des critères par les ingénieurs ;
- la segmentation du linéaire en tronçons de digue homogènes pour chaque critère ;
- le calcul de la performance de chaque tronçon homogène

Une requête du logiciel permet de segmenter spatialement le linéaire en tronçons homogènes. La segmentation est réalisée pour chaque critère selon les variations des valeurs de leurs indicateurs d'états. Ainsi, à chaque critère correspond un découpage du linéaire (Figure 5).

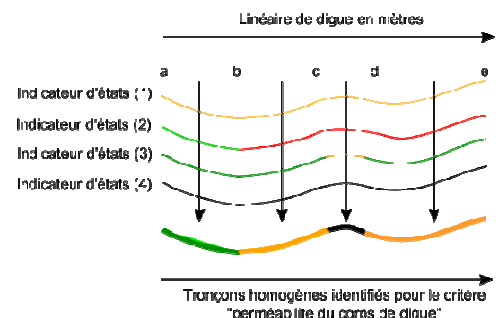


FIGURE 5. ILLUSTRATION DE LA SEGMENTATION DU LINEAIRE POUR UN CRITERE DONNE



Une nouvelle requête du logiciel SIG permet de segmenter le linéaire en tronçons pour lesquels l'ensemble des valeurs des critères d'évaluation sont semblables. Le modèle d'évaluation basé sur le critère unique de synthèse permet d'obtenir automatiquement l'indicateur de performance pour chaque mode de défaillance des digues IP<sub>s</sub>, puis pour l'indicateur de performance global du tronçon IP. Les tronçons sont ainsi triés automatiquement selon la double échelle définie précédemment.

L'ingénieur intervient pour l'élicitation des critères et le contrôle du processus et des résultats assortis au moyen d'un logiciel SIG. Le modèle d'évaluation de la performance des digues se révèle très utile aux ingénieurs et gestionnaires de digue. La semi-automatisation de l'évaluation des digues permet de simplifier significativement le travail de l'ingénieur spécialisé pour la réalisation d'un diagnostic. Notre démarche d'utilisation de probabilités subjectives permet d'intégrer les marges d'incertitude des indicateurs de performance. Il est possible de représenter l'incertitude par une tendance centrale, le mode et les fractiles 5 % et 95 % de la distribution.

Dans l'exemple présenté dans la figure ci-dessous, le linéaire de digues est représenté en abscisse, la performance des tronçons en ordonnée et les marges d'incertitude sous forme de lignes pointillées.

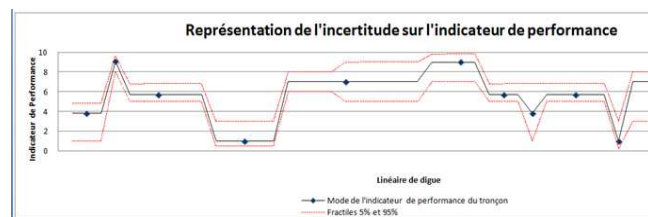


FIGURE 6. ILLUSTRATION DES MARGES D'INCERTITUDE

L'évaluation de l'indicateur de la performance est réalisée tout le long de la digue par analyse des profils homogènes. Le résultat final permet de visualiser tout le long du linéaire de digue la valeur la plus vraisemblable de l'indicateur de performance pour un mécanisme de rupture étudié et l'incertitude pesant sur la connaissance de l'indicateur de performance (Figure 6).

Dans la démarche proposée, les ingénieurs interviennent principalement pour le contrôle des processus et concentrent leur travail d'ingénierie sur des points précis d'analyse des digues. Afin de faciliter l'aide au diagnostic, les indicateurs de performance de chaque mécanisme de rupture pourront être évalués sur l'échelle de décision à 10 valeurs (Figure 1).

Par ailleurs, l'outil *Digsure* permet au gestionnaire de digues de mettre à jour l'évaluation de la performance des ouvrages dans le temps.

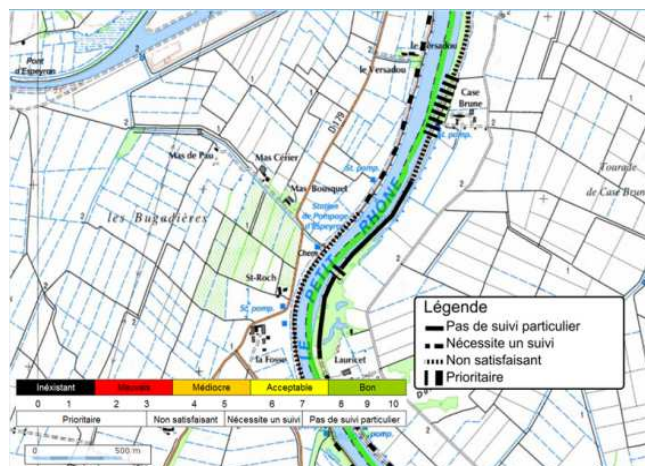


FIGURE 7. ILLUSTRATION DE L'OUTIL *DIGSURE* ET ECHELLE DE DECISION PROPOSEE POUR LE SUIVI DES OUVRAGES

Une fois l'outil *Digsure* configuré et adapté au contexte local par les ingénieurs, lors de chaque inspection de routine, en crue ou post-crue, l'ingénieur peut modifier ou saisir à nouveau les informations relatives aux critères spécifiques et relancer le calcul des scores de performance. Le tri automatique des tronçons en catégories permet alors au gestionnaire de hiérarchiser son investigation. Ce modèle informe l'utilisateur de la performance de ses ouvrages ainsi que des incertitudes y afférentes, tronçon par tronçon. Une fois le modèle intégré dans un outil SIG, le gestionnaire aura la possibilité de :

- hiérarchiser ses investigations pour améliorer la qualité des informations et réduire les incertitudes liées aux indicateurs de performance ;
- préparer ses actions de réhabilitation pour améliorer la performance des ouvrages.

## Conclusion

Le projet *Digsure* a eu pour objectif de produire des indicateurs de performance des digues. Ces indicateurs sont ensuite intégrés dans un outil SIG pour l'aide au diagnostic et à la gestion des ouvrages, destinés aux bureaux d'études et aux services techniques des gestionnaires.

Le modèle *Digsure* intègre un modèle fonctionnel de comportement des digues pour les quatre mécanismes de rupture : submersion, érosion interne, glissement de talus côté fleuve et côté val, et affouillement. Il dispose également, pour chaque mécanisme, des critères d'évaluation des digues et de leurs indicateurs d'état associés. Sur ces bases, des indicateurs de performance des digues ont été développés pour chaque mécanisme. Intégrés à l'outil SIG, l'outil *Digsure* donne la valeur des indicateurs de performance tout le long du linéaire de digues fluviales.

La méthode *Digsure* intègre également une démarche probabiliste permettant de prendre en considération les incertitudes des critères utilisées pour l'évaluation de la performance des digues. Les indicateurs de performance générés sont ainsi exprimés sous forme de distribution de probabilité, indiquant ainsi les marges d'incertitude.

Au final, intégrés au module SIG, la méthode *Digsure* permet à l'ingénieur et au gestionnaire d'établir des priorités et d'apprécier les tronçons où des investigations complémentaires doivent être engagées pour réduire les incertitudes sur la connaissance de la performance de l'ouvrage.

Pour être complet, il convient d'indiquer que le projet *Digsure* comporte également un important axe de recherche relatif à la vulnérabilité des zones protégées par les digues, qui n'est pas présenté dans le présent article. Cet axe a permis de développer des indicateurs de vulnérabilité des zones endiguées. Trois catégories d'indicateurs de vulnérabilité ont été définies : économique, écologique et sociale. Les indicateurs de vulnérabilité économique s'inspirent d'études précédemment menées sur les risques de crue. Les indicateurs de vulnérabilité écologiques valorisent l'ensemble des informations relatives à la protection de l'environnement. Enfin, les indicateurs de vulnérabilité sociale s'appuient sur une approche multi-échelle permettant l'intégration de l'individu en tant que comportement collectif social. Le lecteur intéressé pourra consulter la publication suivante [1].

## Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil Régional de la région Provence Alpes Cote d'Azur, qui a co-financé les travaux décrits dans la présente publication, et le SYMADREM, partenaire du projet, qui a fourni des données et permis la validation des méthodes.

## Références

- [1] Allouche A., Nicolas L., Tourment R., (2012). *Approche socio-anthropologique pour l'évaluation de la vulnérabilité sociale des zones protégées par les digues fluviales du Rhône aval*. Congrès SHF : «Evènements extrêmes fluviaux et maritimes», Paris, 1-2 février 2012
- [2] Serre D., Peyras L., Tourment R., Diab Y. (2008). *Levee Performance Assessment Methods Integrated in a GIS to Support Planning Maintenance Actions*. In Journal of Infrastructure Systems – ASCE, Vol. 14, N° 3, September 1<sup>er</sup>, 2008. p. 201 à 213.
- [3] Vuillet M., Peyras L., Serre L., Diab Y. (2012) Decision Making Method for Assessing Performance of Large Levee Alignment. Journal Decision System. DOI:10.1080/12460125.2012.680354
- [4] Vuillet M., Peyras L., Serre D., Carvajal C. Diab Y. *Levee Performance Evaluation Based on Subjective Probabilities*. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Accepted december 2012.